心理学报 2023, Vol. 55, No. 8, 1243−1254
Acta Psychologica Sinica

https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2023.01243

太极拳技能学习早期大脑功能的动态变化：基于运动表象的 fMRI 研究*

李 琳[1,2] 张小友[1,2] 徐亚奎[1] 宗博艺[1,2] 赵文睿[6]
赵 革[1] 姚 猛[1] 占竺旋[1] 尹大志[3,4] 范明霞[5]

([1]华东师范大学体育与健康学院; [2]华东师范大学青少年健康评价与运动干预教育部重点实验室, 上海 200241)
([3]华东师范大学心理与认知科学学院; [4]华东师范大学上海市脑功能基因组学重点实验室; [5]华东师范大学上海市磁共振重点实验室, 上海 200062) ([6]浙江师范大学体育与健康科学学院, 金华 321004)

摘 要 为了解太极拳技能学习早期大脑功能的动态变化特点, 本研究共招募 29 名太极拳零基础被试(19 名实验组被试, 10 名对照组被试), 采用多时点纵向追踪设计, 借助于功能磁共振成像技术, 采集技能学习早期不同时点被试完成运动表象任务时的行为和脑功能数据。结果发现：(1)太极拳技能学习早期, 技能水平表现出先慢后快的变化特征, 运动表象质量也具有变好的趋势; (2)随着太极拳技能水平的提高, 运动表象任务诱发的左侧颞上回和左侧楔前叶的激活显著增强, 且同样表现出先慢后快的变化特征; (3)相关检验发现, 左侧颞上回和左侧楔前叶的激活与运动表象质量以及太极拳技能水平具有中等程度的相关。研究表明, 太极拳技能学习早期, 左侧颞上回和左侧楔前叶会伴随着太极拳技能水平的提高而发生改变, 太极拳技能学习有助于优化与序列动作学习有关的脑区功能。

关键词 太极拳, 运动技能学习, 运动表象, 功能磁共振成像
分类号 B849

1 引言

运动技能(motor skill)是指借助于神经、骨骼和肌肉系统来实现在身体活动中所需的各种行为操作, 通常是由多个动作单元构成的复杂系统, 需要在学习过程中通过反复练习逐步形成和发展(Shmuelof et al., 2012)。运动技能水平会随着学习进程的推进而逐步提高, 但受技能复杂程度、学习方法等因素的影响, 技能提高的速度会呈现出不同的趋势, 有的运动技能(如短跑等)在学习开始阶段提高迅速, 之后提升速度逐渐减缓; 有的运动技能(如游泳等)在学习开始阶段技能提高比较缓慢, 学习一段时间后技能提高逐渐加快; 而有一些运动技能(如网球等)在学习过程中还会出现技能提高暂时变缓甚至停顿的情况(陈琦, 刘儒德, 2019; 张力为, 毛志雄, 2018)。总的来说, 在运动技能学习过程中, 学习者的技能提高速度会表现出较为显著的阶段性的变化特点, 但在此过程中大脑功能发生了怎样的变化？却鲜有研究进行过探索。

大脑具有可塑性, 大脑的可塑性是指人脑具有的根据行为、学习等内外环境的变化而改变其结构和功能的能力, 是个体心理和行为适应性变化的物质基础(Kolb & Gibb, 2014; Sale et al., 2014)。近年来的脑成像研究发现, 运动技能学习可以塑造大脑静息态和任务态功能的变化(Yang, 2015; 娄虎, 刘萍, 2020; 任占兵 等, 2019)。然而既往研究多采用专家−

收稿日期: 2022-05-31
* 国家自然科学基金(32271096)、国家自然科学基金(81471651)和华东师范大学青少年健康评价与运动干预教育部重点室开放课题资助。
通信作者: 李琳, E-mail: lilin.xtt@163.com

新手的横断面设计，探索某一运动技能的长期学习经验对大脑功能的影响，发现不同项目的运动专家相比于新手，具有特定的脑功能优势(Abreu et al., 2012; Bishop et al., 2013; Tomasino et al., 2013; Wei et al., 2014)。例如，跳水运动员在表象跳水动作时海马旁回的激活更高(Wei & Luo, 2009)；羽毛球运动员左侧顶下小叶的静息态自发神经活动更低(Di et al., 2012)；乒乓球运动员在完成 go/no-go 视觉空间任务时，额中回、眶额区会表现出更低的激活(Guo et al., 2017)，但左侧小脑和左侧颞中回的自发神经活动更高(张牧 等, 2020)。Wu 等人(2018)认为脑区激活的降低可能与神经加工效率的提高有关，而脑区激活的增强可能与专业化程度更高的神经加工能力有关，两者都伴随着相同或更优的行为表现。但此类研究设计只能了解长期学习经验引起的最后变化，无法了解学习过程中大脑功能的变化情况是否也如技能提高速度一样，表现出阶段性特征？特别是运动技能学习早期大脑功能发生了怎样的变化无法得知。运动技能学习的早期阶段是观察大脑功能动态变化非常好的窗口期，对此阶段进行观察比了解长期运动技能学习对脑功能的影响更有价值，因为对于大多数普通人而言，复杂运动技能的学习往往无法达到运动专家的水平。对运动技能学习早期大脑功能动态变化过程的考察，能够帮助人们更好地理解运动与脑可塑性的关系，一方面可以完善运动技能学习与控制的相关理论，另一方面也能够为运动健脑提供更加坚实的实证支撑。

太极拳起源于中国古代道教文化，是需要上、下肢和躯干协调配合的复杂运动技能。太极拳运动过程中需要身体、认知和冥想等共同参与。近些年的研究发现，与新手相比，长期练习太极拳的老年人在海马和梭状回区域的局部一致性(ReHo)更高(Yue et al., 2020)；在额顶控制网络的低频振幅率(fALFF)更低(Wei et al., 2014)；在完成 n-back 工作记忆任务时，额上回等脑区的激活更低(Port et al., 2018)。但上述研究呈现的都是太极拳长期学习引起的脑功能变化，对太极拳技能学习早期大脑功能的动态变化尚不清楚。

对手指序列动作技能学习过程的研究发现(Park et al., 2010)，在技能学习早期(前 4 分钟左右)，技能水平先显著提高，后趋于稳定，同时在感觉运动皮层、辅助运动区等脑区的激活也出现了先增加后降低的变化特点。从该研究可知，简单动作技能学习早期，大脑相应脑区的功能变化与技能水平的变化具有相关性，那么，复杂运动技能学习的早期过程是否也具有同样的表现？目前尚未得知。

磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)是当前进行大脑结构和功能研究最为先进的技术，但采集的过程需要头部固定、采用仰卧姿势，因此无法在运动技能实际执行时采集脑数据。为了建立运动技能与脑的关联，较多学者采用运动表象任务替代技能实际执行(Ross et al., 2003; Wei & Luo, 2009; Zhang et al., 2018)。运动表象(motor imagery)是指在无外部动作输出或者肌肉活动的情况下对简单或复杂动作进行心理模拟的过程(Feltz & Landers, 1983)，包括视觉表象和动觉表象(Hanakawa et al., 2003)。人们发现运动表象和运动实际执行(motor execution)存在着关联，心理计时任务的研究发现两者耗费的时间通常比较接近(Guillot et al., 2012)；肌电(electromyogram, EMG)等外周生理测量技术的研究发现，两者存在着生理水平上的功能一致性(Collet et al., 2011)；脑成像的研究也发现两者之间的神经基础具有重叠性(Guillot et al., 2008)，从而推测运动表象和运动实际执行之间具有“功能等同性” (functional equivalence) (Lafleur et al., 2002)。由于运动表象质量会受到运动技能水平的影响(Zhang et al., 2018)，因此认为对运动技能学习引发的大脑功能动态变化的观测，能够用运动表象任务替代运动的实际执行(Holmes & Collins, 2001)。

综上所述，一方面，目前聚焦于大脑功能动态变化的研究较为缺乏，尚未发现针对太极拳等复杂运动技能学习过程大脑功能动态变化的研究；另一方面，已有研究呈现的大多是长期太极拳技能学习的效果，仍不清楚太极拳技能学习早期大脑功能的动态变化特点。基于上述分析，本研究拟采用多时点纵向追踪设计，借助于功能磁共振成像技术(fMRI)，采集太极拳技能学习早期不同时点个体完成运动表象任务的行为和脑功能数据，同时结合太极拳技能水平和运动表象质量，考察学习者大脑功能的动态变化特点。我们着重考察是否存在着一些特定脑区的激活，可以伴随着技能水平的提高而发生变化，且两者之间具有相关性。

2 方法

2.1 被试

使用 G-power 3.1 (Faul et al., 2009)估计研究中实验组被试所需的样本量，采用先验(prior)分析方法，参考张兰兰等人(2017)研究中具有交互作用脑

区的效应量，本研究将效应量(effect size)设置为 0.32, Power 值(1 − β)设置为 0.80，组数设置为 1，测量数设置为 3，α 值设置为 0.05，计算出实验组最小样本量为 18 人。

被试招募自华东师范大学在读硕士研究生，实验组 20 名，其中 1 人因有幽闭恐惧症退出，19 名被试入组(10 名女性，平均年龄 23.37 岁)。同时为了排除表象任务熟悉性的影响，本研究招募了 10 名在性别、年龄和受教育年限匹配的对照组被试(6 名女性，平均年龄 23 岁)。所有被试均为右利手，视力或矫正视力正常，无色盲或色弱，无身体疾病或精神疾病，太极拳技能均为零基础，使用运动表象问卷评价动觉表象能力，均符合研究要求，两组被试的人口统计学特征见表 1，由表 1 可知，两组被试在性别、年龄、身高、体重、受教育年限和动觉表象得分上均不存在显著差异($p > 0.05$)。本实验按照最新版本赫尔辛基宣言所规定的伦理标准执行，得到了华东师范大学人体受试者保护委员会的批准(批准号：HR 222-2018)，实验前所有被试签署了知情同意书，完成任务后被试会获得一定报酬。

表 1　实验组和对照组人口统计学特征

变量	实验组	对照组	$t(\chi^2)$	p
性别(男/女)	9/10	4/6	0.14	0.705
年龄(年)	23.37 ± 0.90	23.00 ± 0.82	1.08	0.288
身高(米)	1.69 ± 0.08	1.66 ± 0.09	0.93	0.362
体重(公斤)	62.69 ± 6.79	58.00 ± 8.40	1.63	0.114
受教育年限(年)	16.32 ± 0.48	16.50 ± 0.71	−0.84	0.411
动觉表象得分	6.20 ± 0.71	5.63 ± 0.76	2.03	0.053

注：性别采用 χ^2 检验，其余采用独立样本 t 检验。

2.2　太极拳技能学习

实验组被试接受系统的太极拳技能培养，由一名获得国家武术二级运动员证书且有 20 多年太极拳教学经验的教师全程指导和监督。学习安排为：每次 90 分钟、每周 5 次，其中包括 3 次教学指导课和 2 次自主练习课，持续时间为 14 周。每次包括 10 分钟热身运动，60 分钟太极拳技能训练，10 分钟呼吸训练以及 10 分钟放松训练。训练内容以 24 式杨氏太极拳为主，也学习 8 式、16 式太极拳。在实验开始前，与实验组和对照组被试签订了协议，明确要求实验组被试在实验期间不进行其他运动技能的学习和有规律的锻炼(每周 3 次、每次 30 分钟以上、持续至少 3 个月) (Tao et al., 2016)。对照组被试保持正常的学习和生活，也不进行任何运动技能的学习和有规律的锻炼。研究表明运动表象训练能够提高参与者的运动技能水平和静息态脑功能(Chiacchiero et al., 2015; Wang et al., 2019; 游茂林 等, 2020; 钟霞, 柯敏, 2011)，为了避免表象训练对太极拳运动技能提升和被试的脑功能产生影响，要求两组被试在实验期间也不进行太极拳动作的表象训练，并在每次数据采集前口头询问被试是否遵循了上述要求。

由于太极拳是复杂运动技能，为保证表象任务更好地完成，以便有利于脑数据的采集，在征询太极拳教师意见后，将第一次数据采集时间定在学习 2 周后。前 2 周先进行太极拳基本身法、手法和步法的学习。根据完整的学习计划和学习内容，并考虑技能学习的阶段性特点，确定了后两次数据采集的时间，分别为学习 8 周和 14 周，三次采集间隔时间均为 6 周。对照组被试共采集两次数据，对应于实验组的第一次和第三次数据采集时间。

2.3　研究工具

(1)运动表象问卷

采用 Williams 等人(2012)修订的运动表象问卷(Movement Imagery Questionnaire-3, MIQ-3)对被试的运动表象能力进行评估，该问卷具有良好的信效度。问卷共包含 12 道题，要求被试对所描述的动作进行动觉或视觉表象，随后要求被试对表象动作的难易程度进行 7 点评分，1 为“很难感受到或看到”，7 为“很容易感受到或看到”，分别评估动觉(问卷 1~4 题)和视觉(问卷 5~12 题)表象能力。由于本研究重点关注动觉表象，参照前人研究对被试的筛选方法(白学军 等, 2016; 沈诚 等, 2016)，以动觉表象(问卷 1~4 题)平均分超过 4 为入组标准，本研究被试全部符合要求。

(2)运动表象任务

使用 E-Prime 2.0 软件编写，采用组块和事件相关相结合的混合任务设计。整个任务共包含 8 个组块，每个组块任务结束后，会提示被试休息 10 秒，有 7 段休息时间。每个组块包含 4 个试次，每个试次表象其中一个示范动作，动作呈现顺序随机。每个试次开始先呈现红色的“+”，呈现时间为 1 秒。然后呈现 1 张示范动作的图片和文字，如“起势”的图片和文字，呈现时间为 3 秒，接着呈现任务要求界面“请你立刻闭眼开始想象”，被试按照要求采用动觉表象想象动作，表象结束后按“1”键，此时仍然保持闭眼状态，直到听到“嘟嘟”提示音后，被试睁开眼，然后进入下一个试次(见图 1)。

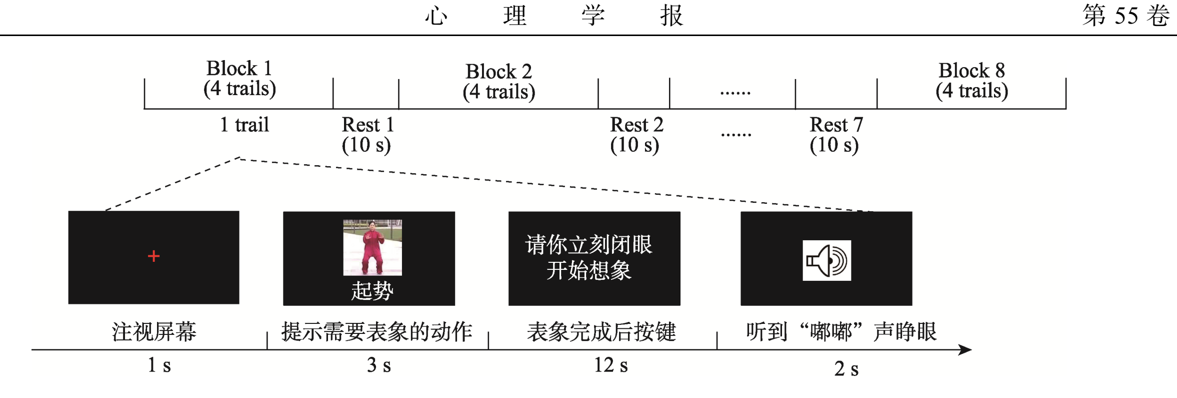


图 1 运动表象任务流程图

示范动作包含 4 个太极拳动作，全部节选自 24 式杨氏太极拳，分别是“起势”“野马分鬃”“白鹤亮翅”和“云手”。这 4 个动作是杨氏太极拳的基本动作，四肢和躯干都参与运动，难度适中，具有一定的代表性。

2.4 实验流程

被试来到实验室后，除第一次需要填写个人基本信息和运动表象问卷外，其余流程如下(见图 2)：首先，被试观看示范动作视频，并在主试带领下进行练习。当被试对 4 个示范动作熟悉后，独立完成动作，每个动作 3 次，主试用秒表记录完成时间，并拍摄动作视频，用于专家对其太极拳技能水平进行评分。

在完成上述任务后，被试先在 MRI 扫描仪外进行一次运动表象任务练习，练习程序和正式程序一致。在练习的过程中，要求被试参照自己实际完成动作时的节奏，采用动觉表象想象每一个动作从开始到结束的完整过程。待被试对实验流程和任务熟悉后，静坐休息 5 分钟，待心率恢复到安静状态后，进入 MRI 扫描仪完成运动表象任务，采集行为与脑数据。此外，为了尽可能排除生物节律的影响，安排同一名被试三次采集尽量在相同或相近的时间段。

2.5 数据采集与分析

2.5.1 行为数据采集

(1)太极拳技能水平

主试将拍摄的被试实际完成 4 个太极拳动作的视频进行匿名编号，并对所有被试的脸部信息进行模糊化处理，然后提供给太极拳专家(中国武术段位七段)，由专家对被试的太极拳技能水平进行评分(评分标准见网络版附表 1)。

(2)运动表象质量

运动表象和运动实际执行的时间一致性是反映和评价运动表象质量的常用指标之一(Collet et al., 2011; Guillot et al., 2012; Malouin et al., 2008)。运动表象时间与运动实际执行时间越接近，时间一致性数值越小，说明运动表象质量就越好(Nakano et al., 2020)。参照沈诚等人(2016)的做法，本研究采用运动表象时间与实际执行时间差值的绝对值。运动表象时间为被试进入 MRI 扫描仪完成表象任务的平均时间(4 个动作，每个动作重复 8 次)，通过 E-Prime 记录。实际执行时间为每名被试完成 12 次(4 个动作，每个动作重复 3 次)动作的平均时间。

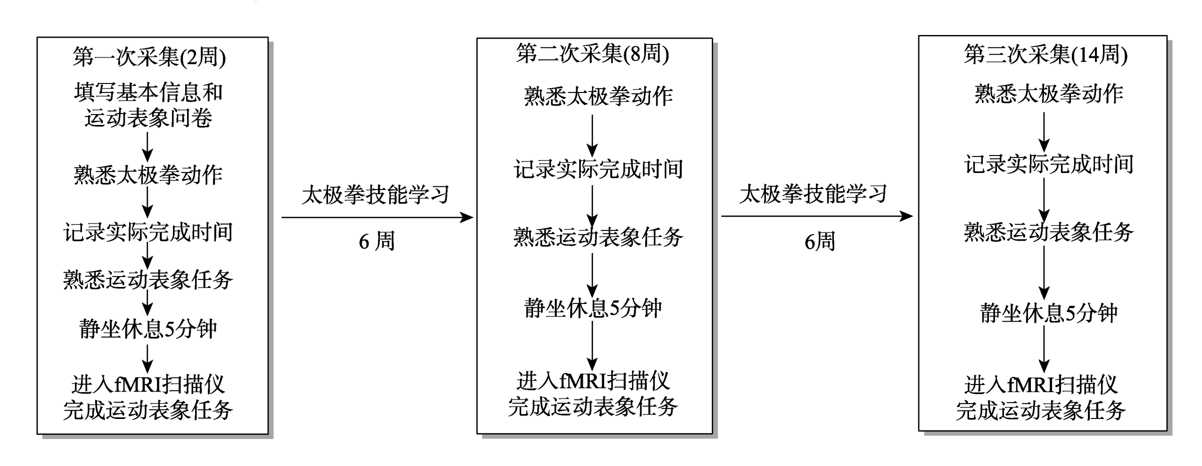


图 2 实验流程图

注：对照组无第二次采集。

2.5.2　脑数据采集和预处理

采用西门子 3.0 T 磁共振扫描仪(型号为Prismafit)进行脑功能像数据的采集。采用标准 20 通道头部线圈, 使用平面回波序列(Echo planar imaging, EPI)采集 T2*功能像, 扫描参数为 TR = 2000 ms, TE = 30 ms, 翻转角度为 90 度, 层厚 3.5 mm, 视野为 220 mm × 220 mm, 体素大小为 3.4 mm × 3.4 mm × 3.5 mm, 共 33 层, 隔层扫描。

使用基于 MATLAB R2013b 中的 SPM 12 工具包对功能像数据进行预处理。首先进行时间校正, 以去除同一时间图像因采集时间差异引起的误差; 接着进行头动校正, 排除头部平动大于 3 mm、转动大于 3 度的被试, 本研究所有采集图像的头动参数均在许可范围内; 然后将校正后的图像进行空间标准化, 采用 SPM 自带 EPI 模板, 归一化到蒙特利尔(Montreal Neurological Institute, MNI)坐标系统, 并将每个体素重新采样至 3 mm × 3 mm × 3 mm; 最后使用高斯核函数进行平滑, 降低空间噪声, 全宽半高值(FWHM)为 6 mm。

2.5.3　行为数据统计分析

行为数据基本服从正态分布, 使用 SPSS 25.0 对行为数据进行统计分析。首先进行 2 (组别: 实验组、对照组) × 2 (时间: 2 周、14 周)两因素重复测量方差分析, 探究两组在太极拳技能水平和运动表象质量上的差异; 然后采用单因素重复测量方差分析, 考察实验组在不同时点太极拳技能水平和运动表象质量的变化, 事后多重比较采用 Bonferroni 校正, t 检验和 F 检验分别采用 Cohen's d 和 η_p^2 计算效应量。此外, 为了使研究结果更为可靠, 我们在已有的零假设检验(NHST)的基础上补充了贝叶斯因子 BF_{10}。

2.5.4　fMRI 数据统计分析

首先使用 SPM 12 进行基于一般线性模型(general linear model, GLM)的个体分析, 感兴趣的回归量(regressor)为表象动作诱发的脑激活, 其开始时间(onset)锁定在提示开始表象界面呈现的时间, 时长(duration)为保持闭眼的 12 秒。不感兴趣的回归量为提示动作的图片和提醒睁眼的铃声, 开始时间为各自界面呈现的时间, 时长分别为 3 秒和 2 秒。此外, 在设计矩阵中还纳入了 6 个头动协变量, 以排除头动的潜在影响。将组块之间休息阶段设置为基线, 对比基线条件得到的每名被试的对比图像即为运动表象诱发的脑激活, 用于后续组分析。

然后分别对实验组被试三次时间的对比图像进行单样本 t 检验, 得到实验组在不同时间的激活结果。接着在 SPM 中选择 flexible factorial 设计构建单因素重复测量方差分析, 上述涉及到脑数据多体素检验的校正阈值设置为体素水平未校正, $p < 0.001$, 团块水平的 FWE 校正, $p < 0.05$。并以方差分析得到的差异脑区峰值点的坐标为球心, 以 6 mm 为半径重新作球形感兴趣区(region of interest, ROI), 使用 RESTplus 提取不同时间实验组被试在各 ROI 内的平均信号值, 并使用 SPSS 25.0 对提取出来的信号值进行方差分析和事后检验, 考察实验组在不同时点相关脑区激活的变化, ROI 平均信号值基本服从正态分布, 事后多重比较采用 Bonferroni 校正, 采用 Cohen's d 和 η_p^2 计算效应量, 并计算了贝叶斯因子 BF_{10} 作为结果的补充。为考察实验组被试表象任务诱发的脑区激活和太极拳表象质量以及技能水平的关系, 首先对三次采集的 ROI 平均信号值、时间一致性和太极拳技能水平进行汇总, 然后采用皮尔逊相关检验分析三个变量之间的关系, 其次对不同采集时间 ROI 平均信号值、时间一致性和太极拳技能水平的变化值进行皮尔逊相关检验, 以探究三个变量的变化是否存在关联。为进一步排除表象任务熟悉性对脑功能变化的影响, 在 SPM 中构建配对样本 t 检验比较对照组前、后测运动表象诱发的脑激活是否存在显著差异。

3　结果

3.1　行为学结果

3.1.1　两因素重复测量方差分析结果

两组被试技能水平和运动表象质量的描述统计结果见表 2。重复测量方差分析发现, 在太极拳技能水平上, 组别主效应显著, $F(1, 27) = 304.54$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.92$, 90% CI [0.87, 0.95], $BF_{10} > 100$, 时间主效应显著, $F(1, 27) = 25.17$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.48$, 90% CI [0.25, 0.64], $BF_{10} > 100$, 组别与时间的交互作用也显著, $F(1, 27) = 28.29$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.51$, 90% CI [0.28, 0.66], $BF_{10} > 100$; 在运动表象质量上, 组别主效应显著, $F(1, 27) = 4.60$, $p = 0.041$, $\eta_p^2 = 0.15$, 90% CI [0.00, 0.35], $BF_{10} > 1$, 时间主效应以及组别与时间的交互作用均不显著($p > 0.05$) (见网络版附表 2)。事后检验发现, 实验组太极拳技能水平在两次测试时差异显著, $t(27) = 8.80$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 2.06$, 95% CI [1.58, 2.54], $BF_{10} > 100$, 而时间一致性差异不显著($p > 0.05$) (见网络版附图 1); 对照组两次测试的太极拳技能水平和时间一致性均不存在显著差异($p > 0.05$) (见网络版附表 3), 说明

在没有经过系统的太极拳学习的情况下，对照组被试的太极拳技能水平和运动表象质量变化不大，没有达到显著性水平。由于本研究重点考察的是学习过程中脑功能的动态变化，因此，后继统计分析将主要聚焦于实验组。

表 2 两组行为学的描述性统计($M \pm SD$)

变量	组别	2 周	14 周
太极拳技能水平	实验组(n = 19)	5.84 ± 0.50	7.55 ± 0.58
	对照组(n = 10)	3.25 ± 0.92	3.20 ± 0.79
时间一致性(ms)	实验组(n = 19)	2045.81 ± 719.99	1641.70 ± 915.47
	对照组(n = 10)	2276.24 ± 1116.19	2799.13 ± 1601.13

3.1.2 实验组单因素重复测量方差结果

对实验组太极拳技能水平进行单因素重复测量方差分析发现，时间主效应显著，$F(2, 36) = 66.84$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.79$, 90% CI [0.68, 0.85], $BF_{10} > 100$；事后检验发现，14 周的技能水平相比于 2 周($t(18) = 9.93$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 2.48$, 95% CI [1.82, 3.15], $BF_{10} > 100$)和 8 周($t(18) = 8.95$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 2.05$, 95% CI [1.44, 2.65], $BF_{10} > 100$)有显著提高，但是 2 周和 8 周的技能水平差异不显著($p > 0.05$)。说明从 2 周到 8 周太极拳技能水平变化不大，而 8 周后技能水平显著提高，从图 3A 可知，技能水平表现出先缓慢后快速的变化特点。对时间一致性进行单因素重复测量方差分析发现，虽然时间主效应不显著($p > 0.05$, $\eta_p^2 = 0.11$)，但随着学习进程的推进运动表象质量有逐渐提高的趋势(见图 3B)。

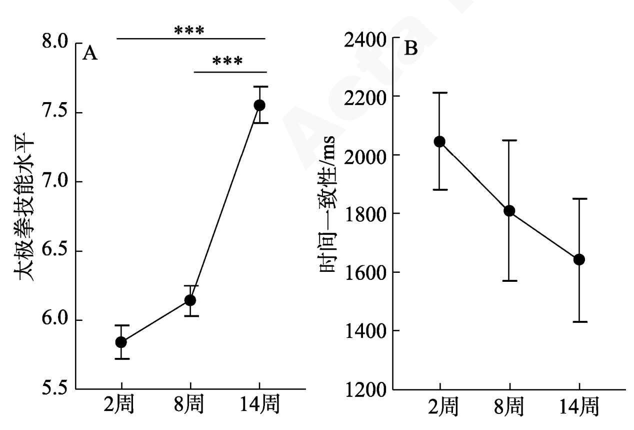


图 3 不同时间(2 周、8 周和 14 周)技能水平(A)和时间一致性(B)的差异

注：**代表 $p < 0.01$, ***代表 $p < 0.001$, 误差线表示平均值的标准误差(standard error, SE)，事后多重比较采用 Bonferroni 校正。

3.2 实验组 fMRI 结果

3.2.1 单样本 t 检验

为考察实验组被试在不同时点的脑区激活情况，分别对三次的对比图像进行单样本 t 检验。结果显示(见图 4 和表 3)，第一次采集(2 周)激活的脑区包括额下回、额中回、辅助运动区、中央前回、中央后回、顶下小叶和颞上回以及颞中回和楔前叶等脑区；第二次采集(8 周)激活的脑区包括辅助运动区、中央前回、颞上回、脑岛、中央后回和顶下小叶以及颞中回和楔前叶等脑区；第三次采集(14 周)激活的脑区包括额下回、辅助运动区、中央前回、中央后回、顶下小叶、颞上回和小脑 6 区以及额中回、旁海马回和楔前叶等脑区。三次采集都激活了类似的额下回、顶下小叶、中央前回、辅助运动区和中央后回等脑区。

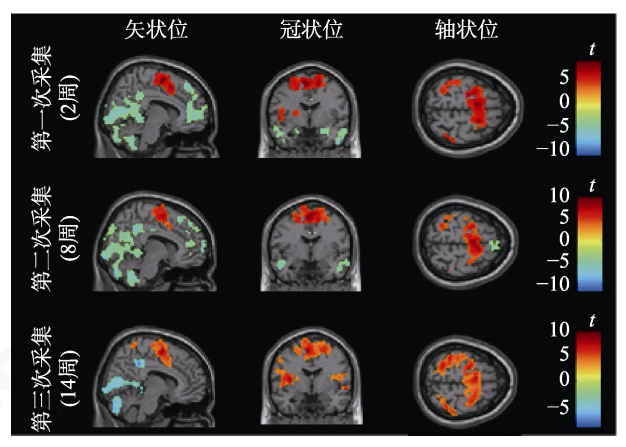


图 4 不同时点运动表象激活的脑区

注：校正阈值为体素水平未校正，$p < 0.001$，团块水平的 FWE 校正，$p < 0.05$；第一次采集体素数量 > 147，第二次采集体素数量 > 119，第三次采集体素数量 > 55。

3.2.2 方差分析

为考察不同时点相关脑区激活的变化情况，进行单因素重复测量方差分析，结果显示，左侧颞上回和左侧楔前叶在不同时点的激活存在显著差异(见表 4)。

3.2.3 ROI 方差分析和事后检验

以方差分析得到的脑区峰值点坐标为球心，以 6 mm 为半径重新作球形 ROI，使用 Restplus 提取每个时点每名被试在两个 ROI 内的平均信号值进行方差分析和事后检验。结果显示(见图 5)，在左侧颞上回上，时间主效应显著，$F(2, 36) = 13.45$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.43$, 90% CI [0.21, 0.58], $BF_{10} > 100$；事后检验发现，与 2 周($t(18) = 3.24$, $p = 0.014$, Cohen's $d = 0.79$, 95% CI [0.15, 1.43], $BF_{10} > 10$)和 8 周($t(18) = 5.05$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.17$, 95% CI [0.56, 1.78], $BF_{10} > 100$)相比，14 周的激活显著增强，但 2 周和 8 周之间不存在显著差异($p > 0.05$)。在左侧楔前叶上，

表 3　不同时点运动表象激活的脑区

激活脑区	半球	体素数量	峰值点 MNI 坐标			*t* 值
			X	Y	Z	
第一次采集(2 周)						
辅助运动区/中央前回/顶下小叶/中央后回/颞上回	左	2542	−9	−3	63	8.92
额下回	右	203	39	15	6	6.76
额中回	左	148	−33	36	27	7.80
中央后回/顶下小叶	右	231	42	−36	45	7.75
距状裂/楔前叶	左/右	4360	27	−27	−6	−11.07
颞中回	右	376	24	15	−21	−7.43
颞中回	左	329	−48	6	−33	−8.01
内侧额上回	左/右	1579	3	63	3	−8.43
第二次采集(8 周)						
脑岛/中央前回/颞上回	左	120	−45	0	3	6.17
顶下小叶/中央后回	左	398	−57	−27	39	7.07
辅助运动区/中央前回	左	1010	−6	−3	60	9.99
顶下小叶/中央后回	右	157	39	−39	42	7.27
小脑 9 区	右	296	3	−54	−45	−8.93
距状裂/楔前叶	左/右	5804	9	−45	39	−11.79
颞中回	右	222	51	3	−39	−7.11
颞中回	左	640	−54	3	−30	−6.60
内侧额上回	左/右	1918	30	63	9	−9.75
第三次采集(14 周)						
颞上回	右	414	63	−21	9	8.81
中央后回/中央前回/颞上回/辅助运动区	左	3352	−51	−21	0	10.28
额下回	右	144	57	9	24	7.94
中央后回	右	511	42	−36	57	8.30
小脑 6 区	右	56	30	−48	−33	6.02
距状裂/楔前叶	左/右	2240	−6	−75	6	−7.64
小脑 9 区	右	81	15	−45	−48	−7.22
旁海马回	左/右	100	27	−27	−6	−8.11
内侧扣带回	左	359	−9	−39	39	−8.28
额中回	右	233	24	42	45	−6.02

注：校正阈值为体素水平未校正，$p < 0.001$，团块水平的 FWE 校正，$p < 0.05$；第一次采集体素数量 > 147，第二次采集体素数量 > 119，第三次采集体素数量 > 55。

表 4　不同时点运动表象激活差异的脑区

激活脑区	半球	体素数量	峰值点 MNI 坐标			*F* 值
			X	Y	Z	
左侧颞上回	左	106	−57	−21	9	15.04
左侧楔前叶	左	61	−3	−54	33	11.33

注：校正阈值为体素水平未校正，$p < 0.001$，团块水平的 FWE 校正，$p < 0.05$，体素数量 > 60。

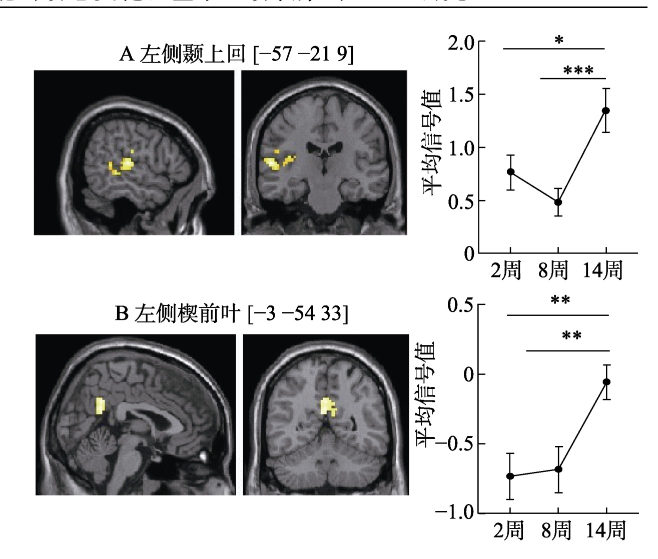


图 5　不同时点左侧颞上回(A)和左侧楔前叶(B)的平均信号值差异

注：左列为交互脑区的矢状面和冠状面，右列分别为以峰值点坐标为球心、6 mm 为半径所作球形 ROI 的平均信号值的事后检验，*代表 $p < 0.05$，**代表 $p < 0.01$，***代表 $p < 0.001$，误差线表示平均值的标准误差(standard error, SE)，事后多重比较采用 Bonferroni 校正。

时间主效应显著，$F(2, 36) = 9.58$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.35$，90% CI [0.13, 0.51]，$BF_{10} > 30$；事后检验发现，14 周的激活相比于 2 周 ($t(18) = 3.89$，$p = 0.003$，Cohen's $d = 0.90$，95% CI [0.29, 1.51]，$BF_{10} > 30$)和 8 周($t(18) = 3.85$，$p = 0.004$，Cohen's $d = 0.84$，95% CI [0.26, 1.41]，$BF_{10} > 30$)出现了显著增强，但 2 周和 8 周之间不存在显著差异($p > 0.05$)。说明随着学习时间的延长，左侧颞上回和左侧楔前叶的功能变化显著，特别是从 8 周到 14 周两个脑区的功能发生了显著改变。

3.3　实验组 ROI、时间一致性和技能水平的关系

首先，为了解大脑功能、表象质量和技能水平三者的总体关系，对三次采集的左侧颞上回和左侧楔前叶的平均信号值、时间一致性和太极拳技能水平汇总后进行皮尔逊相关分析；其次，为探究随着学习时间的延长，大脑功能变化、运动表象质量变化和技能水平变化之间的关系，对不同采集时点左侧颞上回和左侧楔前叶平均信号值的差值、时间一致性的差值和太极拳技能水平的差值进行皮尔逊相关分析。汇总的相关分析结果显示(见表 5 和图 6)，被试 ROI 平均信号值和太极拳技能水平存在显著的中等程度的正相关(左侧颞上回，$r = 0.41$，$p = 0.001$；左侧楔前叶，$r = 0.50$，$p < 0.001$)，表明太极拳技能水平越高，ROI 激活越强。时间一致性和太极拳技能水平存在显著的较弱的负相关($r = -0.27$，$p = 0.042$)，

表明太极拳技能水平越高，时间一致性数值越小，运动表象质量就越好。ROI 平均信号值和时间一致性的相关没有达到 0.05 的显著性水平，但两者存在着负向关联的趋势。差值的相关分析结果显示(见图 7)，从学习 2 周到 14 周，被试左侧楔前叶平均信号值的变化和太极拳技能水平的变化呈显著的中等程度的正相关(r = 0.56, p = 0.013)；而从学习 8 周到 14 周，被试在左侧楔前叶平均信号值的变化和时间一致性的变化呈显著的中等程度的负相关(r = −0.52, p = 0.022)。

总的来看，表象任务诱发的脑区激活、太极拳表象质量和技能水平之间存在着较为紧密的关联，随着太极拳技能水平的提高，运动表象质量变好，相关脑区的激活也得到了增强，显示出太极拳技能学习对脑功能的积极影响。

3.4 对照组 fMRI 结果

在分析实验组脑数据的基础上，同时对对照组进行了配对样本 t 检验。对照组全脑配对样本 t 检验结果显示，即使在未校正的条件下(体素水平未校正，p < 0.001，体素数量 > 10)也不存在显著差异的脑区。进一步的 ROI 配对样本 t 检验显示(见网络版附表 4)，对照组在左侧颞上回和左侧楔前叶的激活均不存在显著差异(p > 0.05)。

4 讨论

本研究采用多时点纵向追踪设计，从神经科学视角动态观测了复杂运动技能学习早期大脑功能发生的变化。发现 14 周的太极拳技能学习，学习者的技能水平逐渐提高，提高速度表现出先慢后快的变化特征，时间一致性(运动表象质量)也具有变好的趋势；脑数据结果发现，随着学习时间的延长，左侧颞上回和左侧楔前叶的功能发生了显著的变化，特别是从 8 周到 14 周两个脑区的激活显著增强；脑和行为的相关分析发现，随着太极拳技能水平的提高，时间一致性(运动表象质量)变好，左侧颞上回和左侧楔前叶的激活也得到了增强。本研究结果为早期太极拳技能学习有助于大脑功能的积极变化提

表 5 各变量的相关分析

变量	M	SD	1	2	3
1 技能水平	6.51	0.91	—		
2 时间一致性(ms)	1831.66	905.61	−0.27*	—	
3 左侧颞上回	0.86	0.81	0.41**	−0.16	—
4 左侧楔前叶	−0.49	0.72	0.50***	−0.18	0.41**

注：*代表 p < 0.05, **代表 p < 0.01, ***代表 p < 0.001。

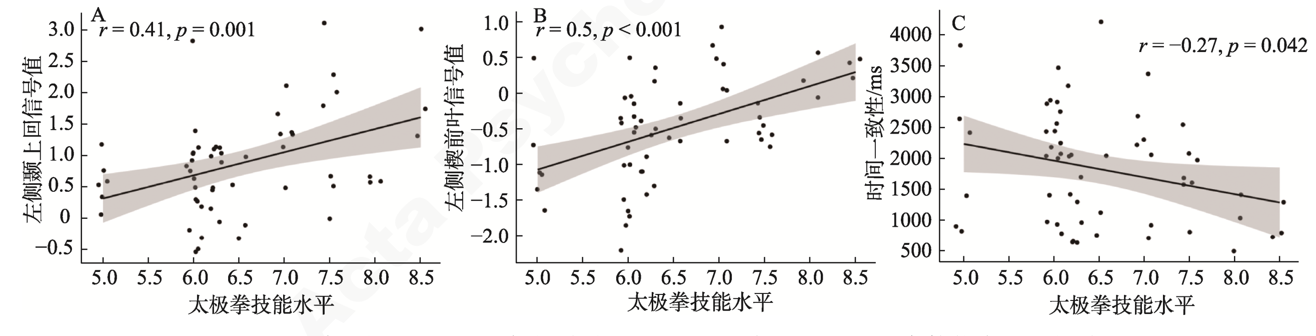


图 6 左侧颞上回(A)、左侧楔前叶(B)、时间一致性(C)和太极拳技能水平的相关
注：图中阴影部分为拟合线的置信区间。

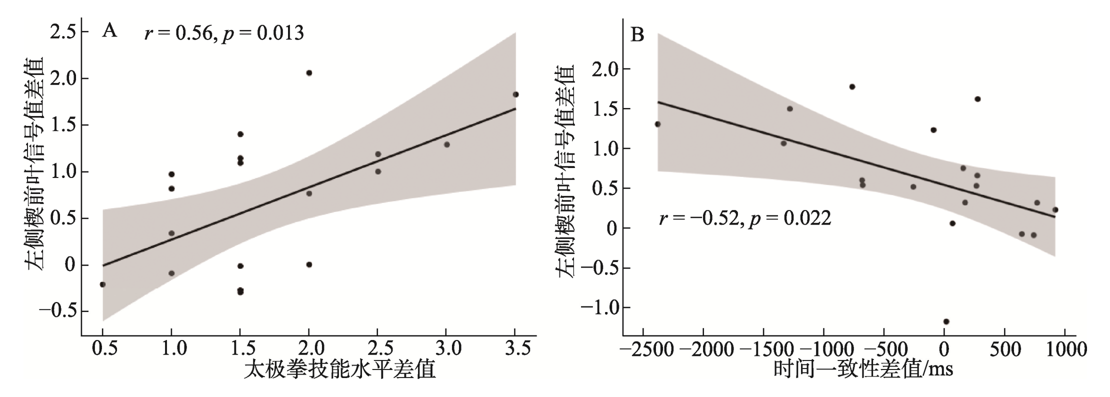


图 7 左侧楔前叶平均信号值差值和太极拳技能水平差值(A)、时间一致性差值(B)的相关
注：(A)的差值为第三次采集(14 周)减去第一次采集(2 周)，(B)的差值为第三次(14 周)减去第二次(8 周)，图中阴影部分为拟合线的置信区间。

供了行为和脑激活层面的证据。值得注意的是, 我们并没有发现时间一致性(运动表象质量)在不同采集时点的显著性差异, 推测可能是本研究的样本量并不十分充足, 导致差异没能达到显著性水平; 此外, 由于磁共振扫描仪的特殊性, 被试在完成运动表象任务的时候处于仰卧位, 这与被试实际完成太极拳动作的站立位存在着较大的差异, 体位的不同可能会对时间一致性指标的精确性造成一定的影响。

本研究发现, 在太极拳技能学习的早期, 技能提高的速度并不是呈线性上升的, 而是显示出了明显的阶段性, 具体表现为从 2 周到 8 周技能水平变化不大, 而从 8 周到 14 周技能水平显著提高, 表现出先慢后快的变化特点。陈琦和刘儒德(2019)以及张力为和毛志雄(2018)认为, 技能学习过程中技能水平的提高呈现先慢后快的特点可能是因为个体新学习的动作技能和过去已有的动作经验关联不大, 可以利用的动作结构比较有限, 需要在一些基本动作上投入较多的精力, 因此刚开始学习时技能变化速度较为缓慢, 经过一段时间的学习, 一旦掌握了基本的动作结构, 技能水平的提高速度就会显著加快。本研究中的太极拳是一项包含了一系列手脚协同且精细、连贯的动作组成的复杂运动技能, 具有节奏缓慢、强度适中及身心合一的特点。在刚开始单个基本动作的学习阶段, 学习者可以利用的运动经验较少, 动作的协调和控制较差, 需要不断重复练习建立新的动作联结, 因此这一阶段技能水平变化不大。待掌握了单个基本动作后, 将这些单个动作组合成完整动作结构就相对容易, 学习者只需要思考动作之间的前后顺序和连接动作, 相对前一个阶段学习难度有所下降, 动作的协调性越来越好, 因此这一阶段技能提升速度会加快。

本研究发现, 运动表象任务在不同时点都激活了类似的额顶认知、运动控制和躯体感觉相关的脑区, 包括额下回、顶下小叶、中央前回、辅助运动区和中央后回等。额顶脑区与高阶认知控制过程相关(Jerde & Curtis, 2013), 中央前回参与运动控制与计划, 辅助运动区还和复杂动作序列的编排有关(Marchand et al., 2013), 而中央后回是参与躯体感觉加工的脑区(Tamè et al., 2016), 三次数据采集都发现了上述脑区的激活, 这可能与太极拳运动表象过程中认知加工和感觉运动加工的整合有关。本研究还发现, 从 8 周到 14 周左侧颞上回和左侧楔前叶由表象任务诱发的激活存在显著的增强, 这可能是 8 周到 14 周太极拳技能学习过程中, 伴随着技能水平的显著快速提高, 相关脑区激活也显著增强的结果。本研究发现脑区功能的变化和太极拳技能的提高表现出了类似的趋势, 8 周到 14 周既是太极拳技能显著提高的阶段, 也是脑功能显著优化的阶段。而且, 脑和行为的相关分析也发现, 左侧颞上回和左侧楔前叶由表象任务诱发的激活和太极拳的技能水平显著相关, 这进一步说明了太极拳技能学习会对左侧颞上回和左侧楔前叶的功能产生显著的积极影响。值得注意的是, 本研究发现, 从 2 周到 8 周, 左侧颞上回的平均信号值虽然出现了暂时的下降, 但是差异并不显著, 推测可能是学习早期, 被试可以利用的已有运动经验较少, 需要不断重复练习单个基本动作, 导致技能的学习出现了一些反复, 表现为这一阶段技能水平变化不大, 因此, 相应的运动表象任务诱发的左侧颞上回的激活也变化不大。

颞上回被认为是镜像神经系统的一部分(Grèzes et al., 2004), 与动作的观察、执行、表象以及动作的理解有关(Fogassi et al., 2005; Tkach et al., 2007), 参与了序列动作的感知加工过程(Bachrach et al., 2016); 楔前叶属于默认网络的一部分(Utevsky et al., 2014), 与正念冥想以及高水平的身体表征相关(Ives-Deliperi et al., 2011), 在动作执行和动作表象过程中负责协调注意在空间目标之间的转换(Oshio et al., 2010)。已有研究也报告了运动技能学习或运动训练引发的颞上回和楔前叶脑区功能或结构的变化, 如赵琦等人(2017)的研究发现专业舞蹈运动员颞上回的局部一致性显著高于没有舞蹈经验的对照组; 张兰兰等人(2017)发现和新手相比, 篮球运动员表象篮球投篮动作时楔前叶的激活显著较强; Yamashita 等人(2021)的研究结果显示, 运动员群体楔前叶的灰质体积显著大于对照组, 并且还与其参与运动训练的时长显著相关; Cui 等人(2019)的研究也发现 8 周的太极拳锻炼显著增加了大学生颞上回、楔前叶等脑区的灰质体积。本研究中, 经过 14 周的系统学习, 特别是从 8 周到 14 周, 随着太极拳技能水平的显著提升, 个体完成太极拳动作越来越熟练, 完成动作的准确性也明显提高, 对涉及到与太极拳动作有关的感知、表象以及内部表征过程变得也越来越好, 而上述心理与行为表现的积极变化可能与颞上回、楔前叶神经加工能力的增强紧密相关, 从而表现出了相关脑区激活的增强, 上述结果为早期太极拳技能学习有助于优化与序列动作学习有关的脑区功能提供了证据。

当然本研究也存在着一些不足。首先, 采用运

动表象任务反映实际的运动执行，尽管该范式已得到广泛的认可和应用，但是仍然无法替代被试实际执行动作，未来希望能够利用更加便携的脑成像设备来探索运动技能学习大脑功能的动态变化特征；其次，由于客观实验条件的限制，本研究仅采集了三次数据，未来对此问题的后续研究会增加采集次数；最后，本研究对照组的样本量偏小，虽然不会影响到本研究主要的研究发现，但是可能无法充分揭示表象任务熟悉性潜在的影响，后续将扩充样本量进一步深入分析。

5 结论

太极拳技能学习早期，大脑左侧颞上回和左侧楔前叶的功能会发生积极变化，表现为由运动表象任务诱发的神经激活显著增强，脑区的功能变化与技能水平的提高存在显著的中等程度的正相关，呈现出先慢后快的变化特征。研究结果提示随着太极拳技能水平的提高，左侧颞上回和左侧楔前叶神经加工能力显著增强，表明早期的太极拳等复杂运动技能的学习会对与序列动作学习有关的脑区功能产生积极影响，表现为能够优化与序列动作有关的感知、表象以及内部表征过程。本研究的结果能够为运动健脑提供更加坚实的实证支撑，从而帮助人们更好地理解运动与脑可塑性的关系。

参 考 文 献

Abreu, A. M., Macaluso, E., Azevedo, R. T., Cesari, P., Urgesi, C., & Aglioti, S. M. (2012). Action anticipation beyond the action observation network: A functional magnetic resonance imaging study in expert basketball players. *The European Journal of Neuroscience*, *35*(10), 1646−1654.

Bachrach, A., Jola, C., & Pallier, C. (2016). Neuronal bases of structural coherence in contemporary dance observation. *NeuroImage*, *124*, 464−472.

Bai, X., Zhang, Q., Zhang, P., Zhou, S., Liu, Y., Song, X., & Peng, G. (2016). Comparison of motor execution and motor imagery brain activation patterns: A fNIRS Study. *Acta Psychologica Sinica*, *48*(5), 495−508.

[白学军, 张琪涵, 章鹏, 周菘, 刘颖, 宋星, 彭国慧. (2016). 基于 fNIRS 的运动执行与运动想象脑激活模式比较. *心理学报*, *48*(5), 495−508.]

Bishop, D. T., Wright, M. J., Jackson, R. C., & Abernethy, B. (2013). Neural bases for anticipation skill in soccer: An fMRI study. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, *35*(1), 98−109.

Chen, Q., & Liu, R. D. (Eds). (2019). *Contemporary psychology of education (third edition)*. Beijing: Beijing Normal University Press.

[陈琦, 刘儒德. (主编). (2019). *当代教育心理学(第三版)*. 北京: 北京师范大学出版社.]

Chiacchiero, M., Cagliostro, P., Degenaro, J., Giannina, C., & Rabinovich, Y. (2015). Motor imagery improves balance in older adults. *Topics in Geriatric Rehabilitation*, *31*(2), 159−163.

Collet, C., Guillot, A., Lebon, F., MacIntyre, T., & Moran, A. (2011). Measuring motor imagery using psychometric, behavioral, and psychophysiological tools. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *39*(2), 85−92.

Cui, L., Yin, H., Lyu, S., Shen, Q., Wang, Y., Li, X., ... Zhu, L. (2019). Tai Chi Chuan vs general aerobic exercise in brain plasticity: A multimodal MRI study. *Scientific Reports*, *9*(1), 17264−17267.

Di, X., Zhu, S., Jin, H., Wang, P., Ye, Z., Zhou, k., ... Rao, H. (2012). Altered resting brain function and structure in professional badminton players. *Brain Connectivity*, *2*(4), 225−233.

Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A.-G. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, *41*(4), 1149−1160.

Feltz, D. L., & Landers, D. M. (1983). The effects of mental practice on motor skill learning and performance: A meta-analysis. *Journal of Sport Psychology*, *5*(1), 25−57.

Fogassi, L., Ferrari, P. F., Gesierich, B., Rozzi, S., Chersi, F., & Rizzolatti, G. (2005). Parietal lobe: From action organization to intention understanding. *Science*, *308*(5722), 662−667.

Gr è zes, J., Frith, C., & Passingham, R. E. (2004). Brain mechanisms for inferring deceit in the actions of others. *The Journal of Neuroscience*, *24*(24), 5500−5505.

Guillot, A., Collet, C., Nguyen, V. A., Malouin, F., Richards, C., & Doyon, J. (2008). Functional neuroanatomical networks associated with expertise in motor imagery. *NeuroImage*, *41*(4), 1471−1483.

Guillot, A., Hoyek, N., Louis, M., & Collet, C. (2012). Understanding the timing of motor imagery: Recent findings and future directions. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, *5*(1), 3−22.

Guo, Z., Li, A., & Yu, L. (2017). "Neural efficiency" of athletes' brain during visuo-spatial task: An fMRI study on table tennis players. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, *11*, 72.

Hanakawa, T., Immisch, I., Toma, K., Dimyan, M. A., van Gelderen, P., & Hallett, M. (2003). Functional properties of brain areas associated with motor execution and imagery. *Journal of Neurophysiology*, *89*(2), 989−1002.

Holmes, P. S., & Collins, D. J. (2001). The PETTLEP approach to motor imagery: A functional equivalence model for sport psychologists. *Journal of Applied Sport Psychology*, *13*(1), 60−83.

Ives-Deliperi, V. L., Solms, M., & Meintjes, E. M. (2011). The neural substrates of mindfulness: An fMRI investigation. *Social Neuroscience*, *6*(3), 231−242.

Jerde, T. A., & Curtis, C. E. (2013). Maps of space in human frontoparietal cortex. *Journal of Physiology, 107*(6), 510−516.

Kolb, B., & Gibb, R. (2014). Searching for the principles of brain plasticity and behavior. *Cortex*, *58*, 251−260.

Lafleur, M. F., Jackson, P. L., Malouin, F., Richards, C. L., Evans, A. C., & Doyon, J. (2002). Motor learning produces parallel dynamic functional changes during the execution and imagination of sequential foot movements. *NeuroImage*, *16*(1), 142−157.

Lou, H., & Liu, P. (2020). The influence of sports training on the brain plasticity of athletes: An ALE analysis of fMRI studies. *China Sport Science, 40*(7), 65−71.

[娄虎, 刘萍. (2020). 运动训练对运动员大脑功能可塑性变化的影响——基于 fMRI 研究的 ALE 分析. *体育科学*,

40(7), 65−71.]
Malouin, F. P., Richards, C. L. P., Durand, A. P., & Doyon, J. P. (2008). Reliability of mental chronometry for assessing motor imagery ability after stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, *89*(2), 311−319.
Marchand, W. R., Lee, J. N., Suchy, Y., Garn, C., Chelune, G., Johnson, S., & Wood, N. (2013). Functional architecture of the cortico-basal ganglia circuitry during motor task execution: Correlations of strength of functional connectivity with neuropsychological task performance among female subjects. *Human Brain Mapping*, *34*(5), 1194−1207.
Nakano, H., Murata, S., Shiraiwa, K., & Nonaka, K. (2020). Increased time difference between imagined and physical walking in older adults at a high risk of falling. *Brain Sciences*, *10*(6), 332.
Oshio, R., Tanaka, S., Sadato, N., Sokabe, M., Hanakawa, T., & Honda, M. (2010). Differential effect of double-pulse TMS applied to dorsal premotor cortex and precuneus during internal operation of visuospatial information. *NeuroImage*, *49*(1), 1108−1115.
Park, J.-W., Kim, Y.-H., Jang, S. H., Chang, W. H., Park, C.-H., & Kim, S. T. (2010). Dynamic changes in the cortico-subcortical network during early motor learning. *NeuroRehabilitation*, *26*(2), 95−103.
Port, A. P., Santaella, D. F., Lacerda, S. S., Speciali, D. S., Balardin, J. B., Lopes, P. B., ... Kozasa, E. H. (2018). Cognition and brain function in elderly Tai Chi practitioners: A case-control study. *Explore, 14*(5), 352−356.
Ren, Z., Hu, L., Zhang, Y., Xu, M., Li, L., Xia, F., & Huang, R. (2019). A review of brain plasticity of motor skill experts: Evidence from magnetic resonance imaging. *China Sport Science and Technology, 55*(2), 3−18.
[任占兵, 胡琳琳, 张远超, 徐敏, 李论雄, 夏丰光, 黄瑞旺. (2019). 运动技能专家脑可塑性研究进展: 来自磁共振成像的证据. *中国体育科技*, *55*(2), 3−18.]
Ross, J. S., Tkach, J., Ruggieri, P. M., Lieber, M., & Lapresto, E. (2003). The mind's eye: Functional MR imaging evaluation of golf motor imagery. *American Journal of Neuroradiology. 24*(6), 1036−1044.
Sale, A., Berardi, N., & Maffei, L. (2014). Environment and brain plasticity: Towards an endogenous pharmacotherapy. *Physiological Reviews*, *94*(1), 189−234.
Shen, C., Wu, Y., Zhang, L., Zhu, H., Dai, W., Li, X., ... Tan, X. (2016). The effect of different proprioception input on motor imagery of complex movement: A fMRI study. *Journal of Tianjin University of Sport, 31*(3), 227−232.
[沈诚, 吴殷, 张兰兰, 朱桦, 戴雯, 李雪佩, ... 谭晓缨. (2016). 不同本体感觉输入对复杂运动动作表象的影响: fMRI 研究. *天津体育学院学报*, *31*(3), 227−232.]
Shmuelof, L., Krakauer, J. W., & Mazzoni, P. (2012). How is a motor skill learned? Change and invariance at the levels of task success and trajectory control. *Journal of Neurophysiology*, *108*(2), 578−594.
Tamè, L., Braun, C., Holmes, N. P., Farnè, A., & Pavani, F. (2016). Bilateral representations of touch in the primary somatosensory cortex. *Cognitive Neuropsychology*, *33*(1−2), 48−66.
Tao, J., Liu, J., Egorova, N., Chen, X., Sun, S., Xue, X., ... Kong, J. (2016). Increased hippocampus−medial prefrontal cortex resting-state functional connectivity and memory function after Tai Chi Chuan practice in elder adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *8, 25*.
Tkach, D., Reimer, J., & Hatsopoulos, N. G. (2007). Congruent activity during action and action observation in motor cortex. *The Journal of Neuroscience*, *27*(48), 13241−13250.
Tomasino, B., Maieron, M., Guatto, E., Fabbro, F., & Rumiati, R. I. (2013). How are the motor system activity and functional connectivity between the cognitive and sensorimotor systems modulated by athletic expertise? *Brain Research*, *1540*, 21−41.
Utevsky, A. V., Smith, D. V., & Huettel, S. A. (2014). Precuneus is a functional core of the default-mode network. *The Journal of Neuroscience*, *34*(3), 932−940.
Wang, H., Xu, G., Wang, X., Sun, C., Zhu, B., Fan, M., ... Sun, L. (2019). The reorganization of resting-state brain networks associated with motor imagery training in chronic stroke patients. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *27*(10), 2237−2245.
Wei, G., & Luo, J. (2009). Sport expert's motor imagery: Functional imaging of professional motor skills and simple motor skills. *Brain Research*, *1341*, 52−62.
Wei, G.-X., Dong, H.-M., Yang, Z., Luo, J., & Zuo, X.-N. (2014). Tai Chi Chuan optimizes the functional organization of the intrinsic human brain architecture in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *6*, 74.
Williams, S., Cumming, J., Ntoumanis, N., Nordin-Bates, S. M., Ramsey, R., & Hall, C. (2012). Further validation and development of the movement imagery questionnaire. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, *34*(5), 621−646.
Wu, M.-T., Tang, P.-F., Goh, J. O. S., Chou, T.-L., Chang, Y.-K., Hsu, Y.-C., ... Lan, C. (2018). Task-switching performance improvements after Tai Chi Chuan training are associated with greater prefrontal activation in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *10*, 280.
Yamashita, M., Suzuki, M., Kawagoe, T., Asano, K., Futada, M., Nakai, R., ... Sekiyama, K. (2021). Impact of early-commenced and continued sports training on the precuneus in older athletes. *Frontiers in Human Neuroscience*, *15*, 766935−766935.
Yang, J. (2015). The influence of motor expertise on the brain activity of motor task performance: A meta-analysis of functional magnetic resonance imaging studies. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *15*(2), 381−394.
You, M., Liu, L., Fan, R., & Tong, J. (2020). Design and effect evaluation of the performance of specific imagery training program: A case study of free throw. *Journal of Shanghai University of Sport*, *44*(11), 28−37.
[游茂林, 刘良辉, 樊荣, 童靖然. (2020). 专项表象训练方案设计与效果测评——以篮球罚球训练为例. *上海体育学院学报*, *44*(11), 28−37.]
Yue, C., Yu, Q., Zhang, Y., Herold, F., Mei, J., Kong, Z., ... Zou, L. (2020). Regular Tai Chi practice is associated with improved memory as well as structural and functional alterations of the hippocampus in the elderly. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *12*, 586770.
Zhang, L., Shen, C., Zhu, H., Li, X., Dai, W., Wu, Y., & Zhang, J. (2017). The effects of motor skill level and somatosensory input on motor imagery: An fMRI study on basketball free shot. *Acta Psychologica Sinica, 49*(3), 307−316.
[张兰兰, 沈诚, 朱桦, 李雪佩, 戴雯, 吴殷, 张剑. (2017). 运动技能水平与躯体感觉输入对运动表象的影响. *心理学报*, *49*(3), 307−316.]
Zhang, L.-L., Pi, Y.-L., Shen, C., Zhu, H., Li, X.-P., Ni, Z., ... Wu, Y. (2018). Expertise-level-dependent functionally plastic changes during motor imagery in basketball players. *Neuroscience*, *380*, 78−89.
Zhang, L. W., & Mao., Z. X. (Eds). (2018). *Sports psychology* (2nd ed.). Shanghai: East China Normal University Press.
[张力为, 毛志雄. (主编). (2018). *运动心理学* (第 2 版). 上海: 华东师范大学出版社.]

Zhang, M., Huang, Y., Gao, Q., & Chen, H. (2020). Brain plasticity of table tennis athletes based on dynamic amplitude of low-frequency fluctuation method. *Journal of Shanghai University of Sport, 44*(6), 62−69.
[张牧，黄月，高晴，陈华富. (2020). 基于动态低频振荡振幅方法的乒乓球运动员脑可塑性变化. *上海体育学院学报, 44*(6), 62−69.]
Zhao, Q., Lu, Y., Wang, Y., & Zhou, C. (2017). The optimization in sensorimotor system in dancers: Evidences from resting state fMRI. *Chinese Journal of Sports Medicine, 36*(12), 1081−1086.
[赵琦，陆颖之，王莹莹，周成林. (2017). 舞蹈运动员大脑感知运动系统的功能特征——一项静息态功能磁共振研究. *中国运动医学杂志, 36*(12), 1081−1086.]
Zhong, X., & Ke, M. (2011). Experimental study of internal and external imagery training on table tennis skill learning. *Journal of Capital University of Physical Education and Sports, 23*(2), 165−168.
[钟霞，柯敏. (2011). 内-外表象训练影响乒乓球技能学习的教学实验. *首都体育学院学报, 23*(2), 165−168.]

Dynamic changes on brain function during early stage of Tai Chi training: A motor imagery-based fMRI study

LI Lin[1,2], ZHANG Xiaoyou[1,2], XU Yakui[1], ZONG Boyi[1,2], ZHAO Wenrui[6], ZHAO Ge[1], YAO Meng[1], ZHAN Zhuxuan[1], YIN Dazhi[3,4], FAN Mingxia[5]

([1] *College of Physical Education and Health, East China Normal University, Shanghai* 200241, *China*) ([2]*Key Laboratory of Adolescent Health Assessment and Exercise Intervention of Ministry of Education, East China Normal University; Shanghai* 200241, *China)*
([3] *School of Psychology and Cognitive Science, East China Normal University, Shanghai* 200062, *China*)
([4] *Shanghai Key Laboratory of Brain Functional Genomics, East China Normal University, Shanghai* 200062, *China*)
([5] *Shanghai Key Laboratory of Magnetic Resonance, East China Normal University, Shanghai* 200062, *China*)
([6] *College of Physical Education and Health Sciences, Zhejiang Normal University, Jinghua* 321004, *China*)

Abstract

Accumulating evidence suggests that regular engagement in physical activity, especially structured physical exercise with complex movement patterns like Tai Chi, is linked to change in brain function as measured by spontaneous and task-evoked neural activities. However, studies on brain function at the early stage of Tai Chi training have yet been conducted despite the fact that understanding changes in neurological activities of motor skill learning at the early stage would facilitate more effective teaching and coaching. To this end, we conducted a longitudinal study in which functional magnetic resonance imaging (fMRI) was used to collect data on brain function and behavioral measures during the early stage of Tai Chi training at multiple time points.

Nineteen college students who had no Tai Chi experience were recruited in this study and they were arranged to attend 14-week Tai Chi training program. Of note, Tai Chi training session was recorded in order to evaluate the quality of Tai Chi form and its skill level (conducted by professor specializing in Tai Chi). Outcome measures were conducted at Week 2, Week 8, and Week 14. Meanwhile, 10 age- and gender-matched college students were considered as control group and they were asked to maintain their unaltered lifestyle with the same outcome measures being arranged at baseline and Week 14. Siemens 3.0 T MRI scanner was used to synchronously collect data on brain function when participants performed a motor imagery task. Group differences on Tai Chi skill level, temporal congruence, and functional activations were investigated using ANOVA while pearson product-moment correlation was performed to examine relationships between them.

Behavioral results showed a learning curve on Tai Chi skill level from slow (Week 2 to Week 8) to fast (after Week 8) as the quality of motor imagery gradually improved. fMRI results showed a similiar pattern of change on brain activities, which changed slowly (Week 2 to Week 8) and increased fastly (after Week 8). Such behavioral changes on skill level were significantly linked to functional activations in the left superior temporal gyrus and the left precuneus.

Motor skill learning has followed a pattern of “slow first, fast later”, which is supported by changes on brain activities in the left superior temporal gyrus and the left precuneus. In addition, Tai Chi is a type of a motor-cognitive exercise with relatively complex movement and its unique routine provides learners with an opportunity to optimize brain function.

Keywords Tai Chi, motor skill learning, motor imagery, fMRI

附录：

太极拳训练计划

(1)训练内容：每次 90 分钟、每周 5 次，其中包括 3 次教学指导课和 2 次自主练习课，持续时间为 14 周，老师全程指导和监督。每次包括 10 分钟热身运动，60 分钟太极拳技能训练，10 分钟呼吸训练以及 10 分钟放松训练。训练内容以 24 式杨氏太极拳为主，也学习 8 式、16 式太极拳。

(2)训练时间和频率：

第一个阶段为期 2 周。热身运动 10 分钟，以拉伸练习和太极站桩为主；技能训练 60 分钟，主要包括太极拳基本的手法、步法练习以及 8 式太极拳的讲解和练习；结束部分 20 分钟，包括 10 分钟的呼吸练习和 10 分钟的放松练习。

第二个阶段为期 6 周。热身运动 10 分钟，以 8 式太极拳练习为主；技能训练 60 分钟，主要包括 16 式和 24 式太极拳的讲解和练习；结束部分 20 分钟，包括 10 分钟的呼吸练习和 10 分钟的放松练习。

第三个阶段为期 6 周。热身运动 10 分钟，以 24 式太极拳练习为主；技能训练 60 分钟，主要包括 24 式太极拳完整和连贯的练习，强化动作规范，提高动作质量；结束部分 20 分钟，包括 10 分钟的呼吸练习和 10 分钟的放松练习。

附表 1　太极拳技能评分标准

评分分值	评分标准
0~2	动作不熟悉，不能完成单式练习
2~4	动作不标准，演练不连贯
4~6	动作基本标准，演练基本连贯
6~8	动作标准，演练流畅，劲力柔和
8~10	节奏、呼吸、神态整体符合太极拳韵味

附表 2　两因素重复测量方差分析(实验组 19 人，对照组 10 人)

因变量		F	p	η_p^2
太极拳技能水平	组别	304.54***	< 0.001	0.92
	时间	25.17***	< 0.001	0.48
	组别 × 时间	28.29***	< 0.001	0.51
表象时间(ms)	组别	0.71	0.406	0.03
	时间	0.14	0.709	0.01
	组别 × 时间	3.05	0.092	0.10
实际执行时间(ms)	组别	66.69***	< 0.001	0.71
	时间	10.50**	0.003	0.28
	组别 × 时间	5.10*	0.032	0.16
时间一致性(ms)	组别	4.60*	0.041	0.15
	时间	0.06	0.812	< 0.01
	组别 × 时间	3.51	0.072	0.12

注：*代表 $p < 0.05$, **代表 $p < 0.01$, ***代表 $p < 0.001$。

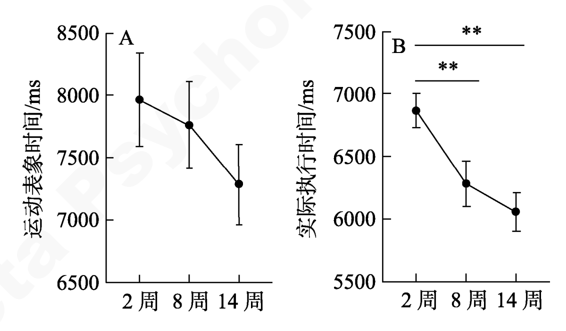
附表 3　组别和时间的事后检验(实验组 19 人，对照组 10 人)

变量	事后检验		t	p	Cohen's d
太极拳技能水平	实验组	前测–后测	-8.80^{***}	< 0.001	−2.06
	对照组	前测–后测	0.19	0.853	−0.06
	前测	实验组–对照组	9.89^{***}	< 0.001	3.12
	后测	实验组–对照组	17.04^{***}	< 0.001	5.23
表象时间(ms)	实验组	前测–后测	1.81	0.082	0.42
	对照组	前测–后测	−0.85	0.405	−0.27
	前测	实验组–对照组	1.54	0.135	0.62
	后测	实验组–对照组	−0.20	0.845	−0.07
实际执行时间(ms)	实验组	前测–后测	4.68^{***}	< 0.001	1.09
	对照组	前测–后测	0.61	0.549	0.20
	前测	实验组–对照组	7.61^{***}	< 0.001	2.73
	后测	实验组–对照组	5.61^{***}	< 0.001	1.83
时间一致性(ms)	实验组	前测–后测	1.39	0.176	0.36
	对照组	前测–后测	−1.31	0.203	−0.42
	前测	实验组–对照组	−0.68	0.504	−0.19
	后测	实验组–对照组	-2.49^{*}	0.019	−0.93

注：*代表 $p < 0.05$, **代表 $p < 0.01$, ***代表 $p < 0.001$。

附表 4　对照组 ROI 的配对样本 t 检验(n = 10)

	前测	后测	t	p	Cohen's d
左侧颞上回	0.25 ± 0.48	0.37 ± 0.52	−0.57	0.580	−0.18
左侧楔前叶	−0.59 ± 0.65	−0.53 ± 0.63	−0.28	0.786	−0.09



附图 1　不同时间(2 周、8 周和 14 周)运动表象时间(A)和实际执行时间(B)的差异

注：**代表 $p < 0.01$，误差线表示平均值的标准误差(standard error, SE)，事后多重比较采用 Bonferroni 校正。